SAW-componenten

De kans is groot dat u er nog nooit van hebt gehoord, maar toch zitten er een paar SAW's in uw broekzak. SAW-componenten, letterwoord van 'Surface Acoustic Waves', zitten namelijk in iedere smartphone.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl

Publicatiedatum: 19-08-2021

Kennismaking met Surface Acoustic Waves componenten

De SAW-technologie
Deze technologie houdt zich bezig met het omzetten van elektrische wisselspanningen in mechanische trillingen in piëzo-elektrische materialen. Nadien worden deze trillingen weer omgezet in elektrische spanningen. Door een juiste keuze van het materiaal en de juiste constructie van de omzetters kan men op een relatief eenvoudige manier een heleboel nuttige elektronische componenten maken, zoals afgestemde filters, resonatoren, maar zelfs frequentie-analysatoren en transversaal filters.
SAW-componenten zijn niet nieuw maar werden op het einde van de vorige eeuw uitsluitend toegepast in dure professionele en militaire elektronica. Tegenwoordig is deze technologie echter ook doorgedrongen tot de consumenten-elektronica. In iedere analoge TV, draagbare telefoon en satellietontvanger worden SAW's toegepast.

Oppervlakte golven
Iedereen die wel eens een steentje in een rimpelloze vijver heeft gegooid, heeft opgemerkt dat daar waar de steen het water raakt er golven ontstaan, die zich cirkelvormig over de vijver uitbreiden. Dat is een typisch voorbeeld van een oppervlakte golf. Oppervlakte golf, omdat deze golf zich verplaatst over de waterspiegel en niet erg diep in het water doordringt. Niet alleen vloeistoffen kennen dit verschijnsel, ook in vaste stoffen kunnen oppervlakte golven ontstaan. De Engelse natuurkundige Rayleigh gaf in 1885 een wiskundige beschrijving van de oppervlakte golven die zich na een aardbeving over het oppervlak van de aarde voortplanten. Hetzelfde verschijnsel doet zich voor na iedere grote drukverandering in de aarde. Denk bijvoorbeeld aan een ondergrondse ontploffing van een atoombom. Wie een dergelijke gebeurtenis op TV ziet, zal onmiddellijk de oppervlakte golf opmerken, die ontstaat rond de plaats van de explosie.
Dergelijke golven worden akoestische oppervlakte golven genoemd, vanwege hun grote golflengten. In het Engels wordt dat '*Surface Acoustic Waves*', afgekort tot '*SAW*'.

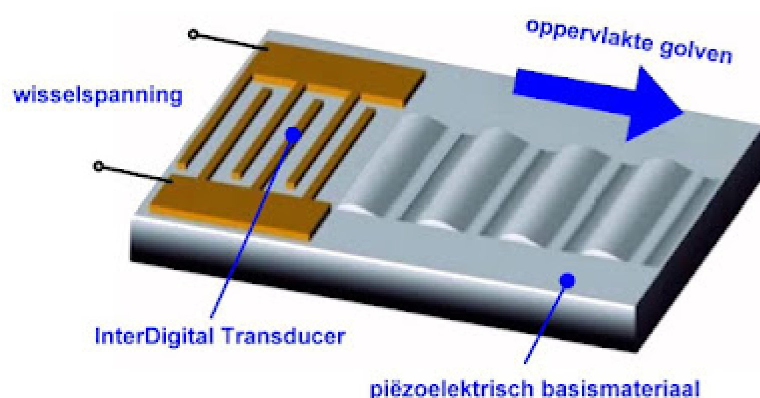
Elektrische oppervlakte golven
In 1965 toonden twee Amerikaanse wetenschappers, White en Voltmer, aan dat dergelijke golven ook elektrisch kunnen worden opgewekt in een dunne laag piëzo-elektrisch materiaal. Elektronici zagen hierin onmiddellijk een hele reeks toepassingen en de research verplaatste zich van het fundamenteel wetenschappelijk onderzoek naar de laboratoria van diverse onderdelen fabrikanten.

Piëzo-elektrische materialen
Piëzo-elektrische materialen zijn materialen die, onder invloed van een elektrisch veld, vervormen. Het materiaal zal tussen het veld samengedrukt of uitgerekt worden. Omgekeerd zal zo'n materiaal, als het wordt uitgerekt of samengeperst, tussen twee er op bevestigde elektroden een elektrische spanning genereren. Het materiaal reageert dus op een

wisselende spanning door een beweging uit te voeren en vice versa. Dit verschijnsel is al lang bekend en er zijn tal van nuttige toepassingen bedacht, zoals microfoons en luidsprekertjes. Het lag voor de hand dat dit materiaal als eerste in aanmerking kwam om te onderzoeken of men ook hierin oppervlakte golven zou kunnen opwekken.

Het opwekken van akoestische oppervlakte golven

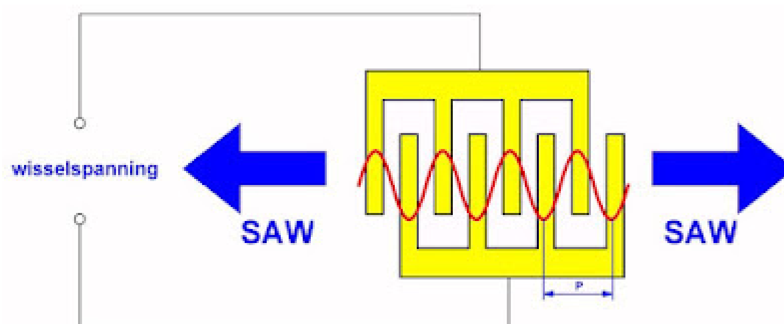
Het principe van het genereren van akoestische oppervlakte golven in een plaatje van een piëzo-elektrisch materiaal wordt toegelicht aan de hand van de onderstaande figuur. Op een zeer dun plaatje piëzo-elektrisch materiaal, het substraat genoemd, worden twee kamvormige metalen constructies opgedampt. De '*tanden*' van de '*kammen*' grijpen in elkaar. Deze tanden worden de '*vingers*' genoemd. Meestal bestaan deze kammen uit opgedampt aluminium met een dikte van 0,05 µm tot 0,005 µm. De basis van de kammen wordt de '*busbar*' genoemd. De volledige opgedampte constructie heet de '*InterDigital Transducer*', afgekort tot '*IDT*'.



De generatie van akoestische oppervlakte golven.
(© 2021 Jos Verstraten)

Het afstemmen van een IDT

Als men nu de twee busbars van de IDT verbindt met een wisselspanning, dan zullen er tussen de vingers wisselende elektrische velden ontstaan, die niet alleen in grootte, maar ook in polariteit wisselen. Het gevolg is dat het piëzo-elektrisch materiaal tussen de vingers gaat uitzetten en inkrimpen. Deze mechanische bewegingen wekken een akoestische oppervlakte golf op, in de tekening voorgesteld door de blauwe pijl. Deze golf verspreidt zich zowel naar links als naar rechts over het oppervlak van het plaatje piëzo-elektrisch materiaal. In de onderstaande figuur is hetzelfde principe nog eens getekend, maar nu in bovenaanzicht. Duidelijk blijkt nu hoe de golven ontstaan tussen de vingers van de kammen. De periode van de golf wordt dus bepaald door de onderlinge afstand tussen de vingers van de kammen. Het zal uit deze figuur ook onmiddellijk duidelijk worden dat er een zeer streng verband bestaat tussen de frequentie van het aangelegde signaal en de afstand tussen de vingers.



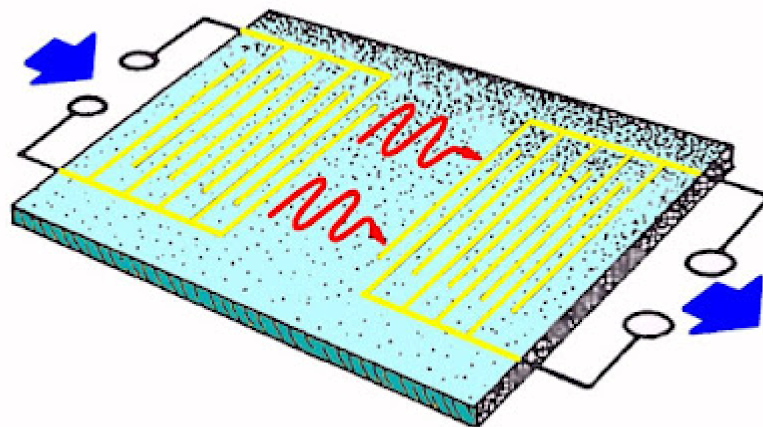
De golflengte van de oppervlakte golven.
(© 2021 Jos Verstraten)

Stel dat aan de getekende constructie een sinusvormig signaal wordt gelegd met een frequentie van 100 MHz. Als het substraat vervaardigd is uit lithium-tantalium, dan zal de oppervlakte golf een snelheid ontwikkelen van 3.200 m/s. De golflengte van een 100 MHz

signaal dat zich met deze snelheid verspreid is 32 µm. Om een maximale amplitude van de golven te produceren moet de IDT worden afgestemd op deze lengte. Men zegt dat de IDT een periode moet hebben van 32 µm. Een volledige golflengte past, dat blijkt duidelijk uit de tekening, tussen drie tanden van de IDT. Als de vingers even dik zijn als hun onderlinge afstand, moet deze onderlinge afstand gelijk zijn aan 8 µm. Alleen dan zal de IDT zijn afgestemd op een signaal met een frequentie van 100 MHz.

Besluit
De belangrijke conclusie die u uit dit verhaal kunt trekken, is dat men een IDT kan afstemmen op een bepaalde frequentie. Hetgeen onmiddellijk het vermoeden doet ontstaan dat men SAW-componenten kan gebruiken voor het maken van afgestemde filters.

Van golf naar spanning
Natuurlijk moeten de oppervlakte golven, die zich voortplanten via het oppervlak van het substraat, weer omgezet worden in een elektrische spanning. Dat doet men door een tweede IDT op het substraat op te dampen, op een bepaalde afstand van de eerste. Een volledig SAW-component heeft dus altijd twee IDT's, zoals geschetst in de onderstaande figuur. Dank zij het piëzo-elektrisch effect zullen de akoestische oppervlakte golven in de vingers van de tweede IDT een elektrische spanning genereren. Ook die kan zo berekend worden, dat de grootste spanning ontstaat bij een golflengte die afhankelijk is van de afstand tussen de vingers. Op deze manier kan men dus op een heel eenvoudige manier een afgestemd filter maken.



Samenstelling van een volledige SAW-chip. (© 2021 Jos Verstraten)

Het SAW-substraat
Aan het substraat worden hoge eisen gesteld. Het moet bestaan uit een anisotropische monokristallijne grondstof, aangezien deze de beste eigenschappen heeft voor het beoogde doel. In de praktijk maakt men gebruik van de drie onderstaande chemische verbindingen:

- Lithium-niobaat $LiNbO_3$
- Lithium-tantalaat $LiTaO_3$
- Kwarts SiO_3

Deze materialen worden tegenwoordig volledig synthetisch gemaakt. Om het basismateriaal de gunstigste eigenschappen te geven wordt het gesmolten materiaal verhit tot iets boven het zo genoemde Curie-punt. Bij $LiNbO_3$ ligt dit punt bij +1.160 °C. Hierdoor krijgt het materiaal de optimale elektrostatische eigenschappen. Nadien wordt de smelt langzaam afgekoeld terwijl men het onder invloed brengt van een sterk elektrisch veld. Op deze manier worden alle elektrostatische dipolen in één richting gedraaid. Uit dit basismateriaal worden zeer dunne plakjes gezaagd, die aan één kant een grondige en zeer fijne polijstbewerking ondergaan. De metalen IDT's worden op de gepolijste kant aangebracht met de traditionele technieken die van de IC-fabricage bekend zijn.

De voortplantingssnelheid en golflengte
De voortplantingssnelheid van de akoestische oppervlakte golven is veel lager dan deze van

de elektromagnetische golven door de lucht. Als de oppervlaktestructuur heel glad is (vandaar het polijsten) is de snelheid echter volledig onafhankelijk van de frequentie. Voor de gebruikte materialen ligt de snelheid rond 3.000 meter per seconde. Dat betekent dat deze oppervlakte golven ruim 100.000 keer trager gaan dan elektromagnetische golven! Een en ander heeft echter tot gevolg dat, voor een en dezelfde frequentie, de golflengte van een oppervlakte golf ook 100.000 maal korter is dat de elektromagnetische golflengte. Een elektromagnetisch signaal met een frequentie van 30 MHz heeft een golflengte van 10 meter. Zet men dit signaal echter via een SAW om in een oppervlakte golf, dan wordt de golflengte gereduceerd tot 0,1 mm. Dank zij deze fysische eigenschap kan men SAW-componenten maken met afmetingen die praktisch realiseerbaar zijn.

Eigenschappen van SAW-chip's

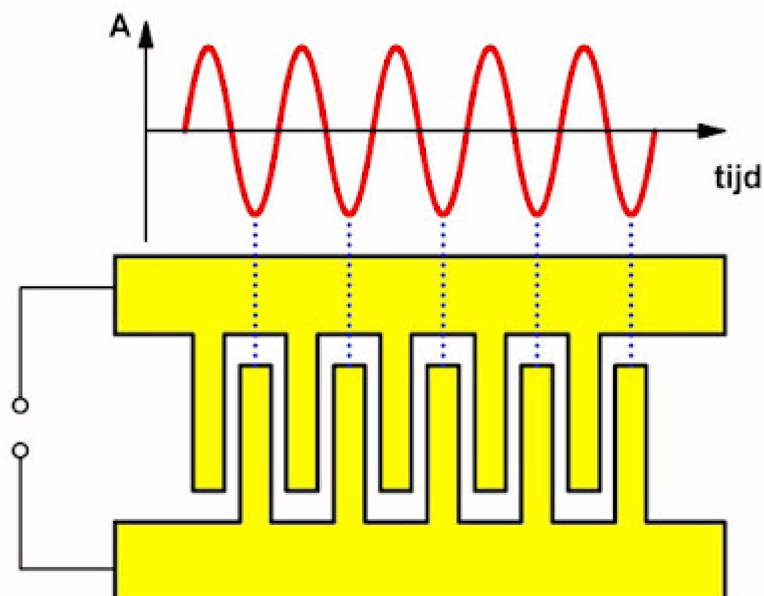
Inleiding

Een SAW-chip heeft een aantal interessante elektrische eigenschappen, waarvan de voornaamste zijn:

- Het golfpakket
- De bandbreedte
- De groeplooptijd
- De piëzo-elektrische koppelfactor
- De triple transit echo
- De direct breakthough
- De edge reflections
- De puls respons
- Het equivalent schema

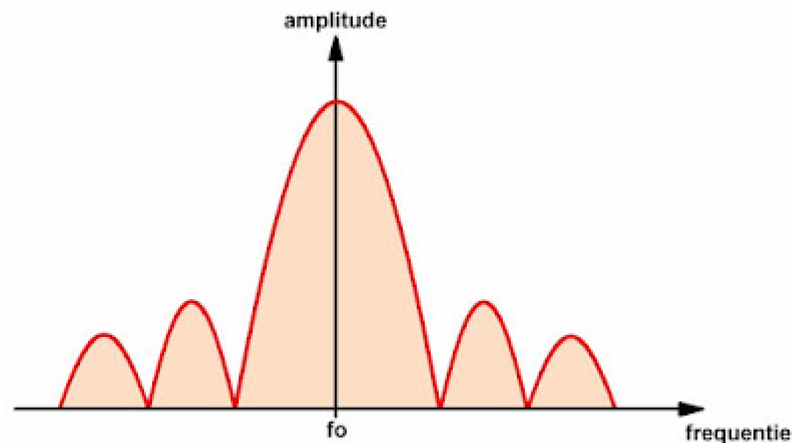
Het golfpakket

Stel dat aan een IDT, die is samengesteld uit twee kammen met ieder vijf vingers (zie de onderstaande figuur) een zeer smalle elektrische puls wordt gelegd. Deze puls zorgt ervoor dat alle vingers van de ene kam eventjes positief worden ten opzichte van alle vingers van de andere kam. Tussen de vingers worden de oppervlakte golven gegenereerd, dit noemt men een golfpakket. Hoeveel golven er worden gegenereerd in dit pakket is afhankelijk van het aantal vingers van de IDT. Hoe meer vingers, hoe meer perioden de oppervlakte golf zal hebben. Het is niet de breedte van de elektrische puls die aan de IDT wordt gelegd die het aantal golven bepaalt, maar de geometrie van de IDT.



Het ontstaan van het golfpakket. (© 2021 Jos Verstraten)

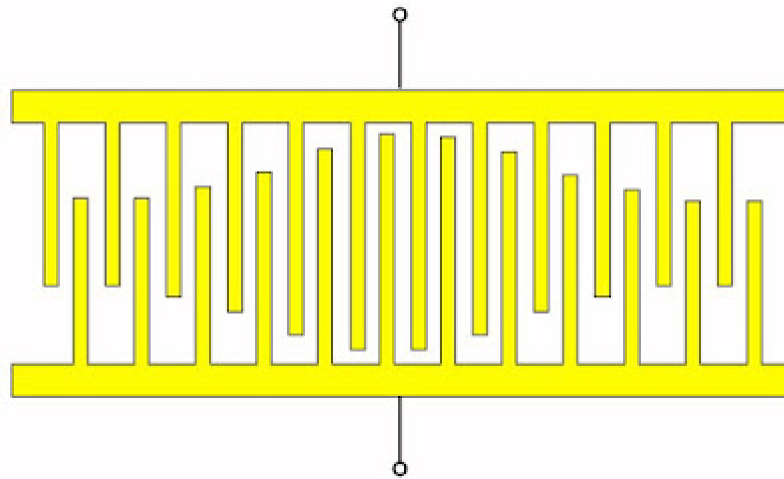
De bandbreedte
Een tweede belangrijk aspect is de amplitude/frequentie karakteristiek van de ontvangende IDT. De golven planten zich rechtlijnig over het substraat voort en zullen een na een tussen de vingers van de ontvangende IDT verschijnen. Als de eerste golf aankomt zullen de eerste vingers van de IDT in het mechanische spanningsveld komen en een spanning genereren. Deze wordt afgevoerd door de busbar's van de twee kammen. Nadien komt de eerste golf onder de volgende vingers en arriveert de tweede golf onder de eerste vingers. De tweede vingers genereren nu een maximale spanning, maar ook de eerste vingers leveren een bijdrage aan de totale spanning die via de busbar's wordt afgevoerd. Vanwege de relatief lage voortplantingssnelheid van de oppervlakte golven duurt het een bepaalde tijd alvorens de IDT zijn maximale spanning genereert. Maar gedurende dat genereren van spanning schuiven de golven van links naar rechts onder de vingers door.
Het zal duidelijk zijn dat er momenten zijn waarop twee bepaalde vingers een spanning genereren die in tegenfase is met de spanning die door twee andere vingers wordt opgewekt. Men zegt dan ook dat het binnenkomend golfpakket wordt bemonsterd door de geometrie van de IDT. De plaats en de lengte van de overlappingen van de aangrenzende vingers bepalen achtereenvolgens de fase en de sterkte van het geïnduceerd elektrisch signaal. Een en ander heeft tot gevolg dat een ontvangende IDT een specifieke bandbreedte heeft, waarvan het verloop is geschetst in de onderstaande figuur.



Het typisch verloop van de bandbreedte van een IDT.
(© 2021 Jos Verstraten)

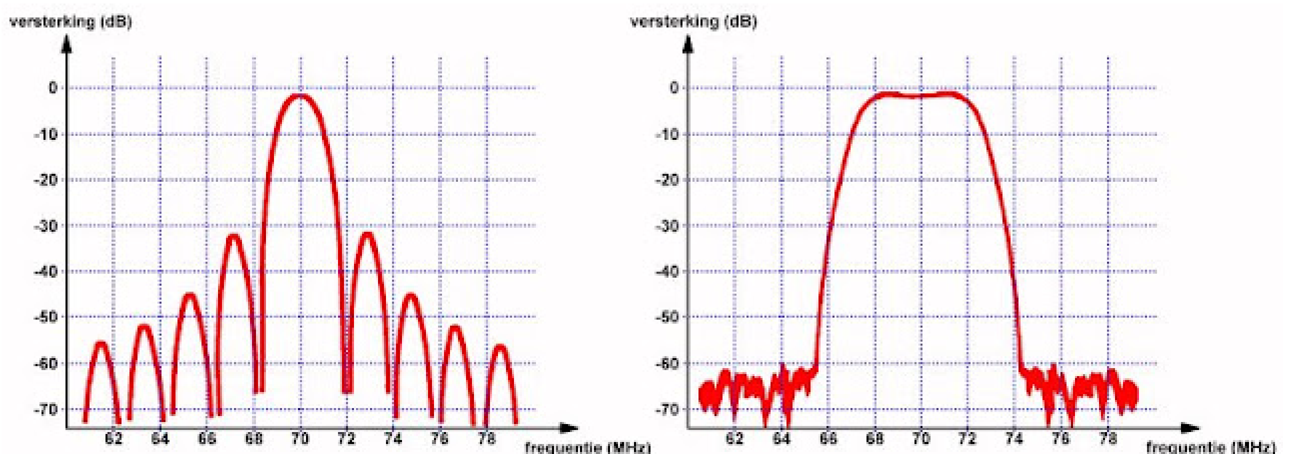
De centrale frequentie f_o wordt vastgelegd door de afstand tussen de vingers, het aantal vingers bepaalt de bandbreedte. Hoe meer vingers er aanwezig zijn, hoe kleiner de bandbreedte wordt. Naast de primaire doorlaatband zijn er een aantal zijlobben, die symmetrisch liggen ten opzichte van de centrale frequentie f_o.

Gewogen IDT's
Door de geometrie van de IDT aan te passen kan men invloed uitoefenen op het verloop van de bandbreedte. Zo kan men, door niet alle vingers even lang te maken, de bandbreedte binnen bepaalde grenzen beïnvloeden door bijvoorbeeld de meestal ongewenste zijlobben te verwijderen. Een dergelijke IDT noemt men een '*gewogen*' IDT. Hoe een dergelijke constructie er uit kan zien is geschetst in de onderstaande figuur.



Een voorbeeld van een gewogen IDT. (© 2021 Jos Verstraten)

De invloed op de bandbreedte
De invloed van het wegen van een IDT op de bandbreedte is groot. Ter illustratie zijn in de onderstaande figuur twee bandbreedtes getekend. De linker is van een SAW-filter, afgestemd op 70 MHz, waar géén gewogen IDT werd toegepast. U stelt vast dat dit filter een vrij smalle bandbreedte heeft en bovendien een heleboel zijlobben, waarvan de eersten slechts 30 dB worden onderdrukt. De rechter karakteristiek geldt voor een identiek filter, waarvan de ontvangende IDT gewogen werd. Commentaar zonder enige twijfel overbodig! Zo'n gewogen IDT kan heel veel vingers hebben, IDT's die uit meer dan 1.000 vingers bestaan zijn geen uitzondering!



Invloed van de gewogen IDT op de bandbreedte van het filter. (© 2021 Jos Verstraten)

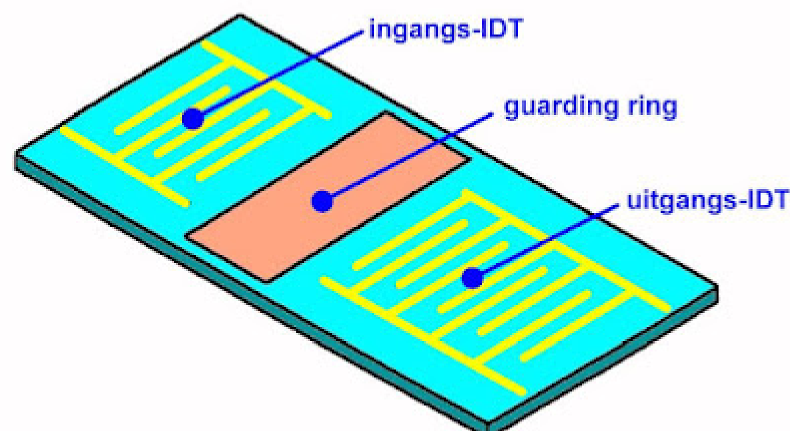
De groeplooptijd
De groeplooptijd, voorgesteld door het symbool τ_o, wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de voortplantingssnelheid v van de oppervlakte golven en de afstand d tussen het midden van de beide IDT's. In formulevorm:
$\tau_o = d / v$
Bij de meeste SAW-filters bedraagt de groeplooptijd ongeveer 1 µs. De groeplooptijd is tamelijk onafhankelijk van de golflengte van de oppervlakte golven en dus ook van de frequentie van het aangelegde signaal.

De piëzo-elektrische koppelfactor
De voortplantingssnelheid over het vrije oppervlak van het substraat is iets groter dan daar waar de IDT's opgedampt zijn. Dit wordt veroorzaakt door de geleidbaarheid en de massa van de vingers, die een bepaalde plaatselijke materiaal-stugheid veroorzaken. Dit verschil wordt gedefinieerd door de piëzo-elektrische koppelfactor k, die wordt bepaald door:
$k^2 = [(V_{vrij} - V_{IDT}) / (V_{vrij})] - 100$ %
Voor lithium-niobaat bedraagt de piëzo-elektrische koppelfactor 4,5 % tot 5,5 %. Voor lithium-tantalaat meet men 0,75 % en voor kwarts slechts 0,16 %.

Wat is de praktische betekenis van deze grootheid? Het verschil in voortplantingssnelheid veroorzaakt een breking van de oppervlakte golven aan het scheidingsoppervlak tussen het substraat en de vingers van de IDT's. Dat is te vergelijken met de breking van lichtgolven aan het oppervlak van water. Het gevolg is dat er ongewenste reflecties ontstaan tussen de vingers van de IDT. Deze reflecties hebben een nadelig effect op de vorm van de bandbreedte. Deze reflecties moeten gedempt worden door speciale reflectie-absorberende structuren op het substraat aan te brengen. Hoe kleiner de piëzo-elektrische koppelfactor, hoe minder last men heeft van deze reflecties en hoe minder extra onderdelen met op het substraat moet aanbrengen.

De triple transit echo
Een voor SAW-componenten typisch stoorsignaal is de zogenoemde '*triple transit echo*'. Zoals reeds besproken zullen er rond de ontvangende IDT reflecties ontstaan. De golven die naar de randen van het substraat divergeren kunnen onderdrukt worden door technologische maatregelen. Maar er zijn natuurlijk ook golven die worden uitgestraald in de richting van de zendende IDT. Daar aangekomen, veroorzaken zij opnieuw reflecties en een deel van de nu erg verzwakte golven gaan weer richting ontvangende IDT. Daar zorgen deze golven voor het genereren van kleine spanningen. Ieder golfpakket dat wordt uitgezonden door de ene IDT zal dus steeds twee spanningspulstreinen veroorzaken in de tweede IDT. De eerste, grote pulstrein wordt veroorzaakt door het binnenkomende golfpakket. Even later verschijnt een tweede, veel kleinere pulstrein aan de uitgang als gevolg van de '*triple transit echo*'.
Deze echo, ook wel afgekort tot '*TTE*', heeft nadelige effecten op de elektrische karakteristieken van het SAW-component, maar kan principieel niet onderdrukt worden.

De direct breakthough
De gehele constructie van een SAW kan worden opgevat als een condensator, waarbij de twee IDT's de platen voorstellen en het substraat het diëlektricum. Hoewel de waarde van deze condensator zeer klein is, zal deze toch een bepaalde impedantie hebben. Deze impedantie is een wisselstroomweerstand, met als gevolg dat het aanleggen van een elektrisch signaal op de ene IDT tot gevolg heeft dat er onmiddellijk een klein signaaltje in de tweede IDT ontstaat. Dit signaaltje noemt men de '*direct breakthrough*' van de SAW en het zal duidelijk zijn dat dit storend signaal zo klein mogelijk gemaakt moet worden. Dit kan door tussen de twee IDT's een zogenoemde '*guarding ring*' aan te brengen. Zoals uit de afbeelding van de onderstaande figuur blijkt, bestaat deze guarding ring uit een plaatje metaal dat tussen de twee IDT's op het oppervlak van het substraat wordt opgedampt.
Door dit plaatje met de massa van de schakeling, waarin de SAW wordt gebruikt, te verbinden wordt de directe capacitieve koppeling tussen de ingang en de uitgang gereduceerd.

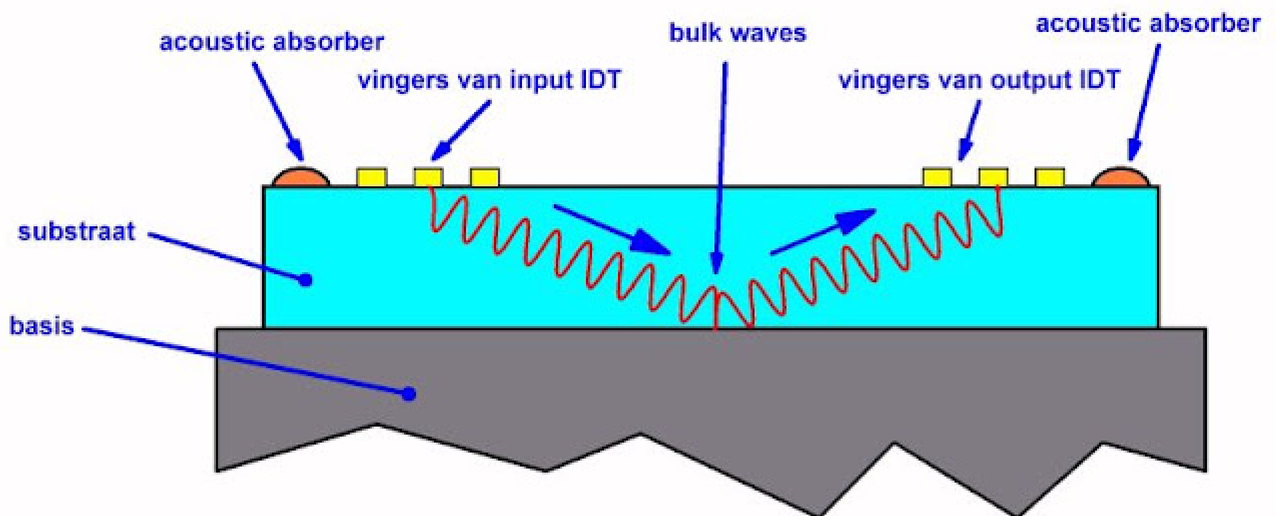


Minimaliseren van de direct breakthough. (© 2021 Jos Verstraten)

De edge reflections
De oppervlakte golven die door een IDT worden uitgezonden verspreiden zich natuurlijk niet alleen naar de tweede IDT. Er gaan ook golven naar de randen van het substraat. Ook hier worden de golven gebroken, hetgeen zich uit in reflecties. Deze reflecties zullen allemaal op

een bepaald moment bij de ontvangende IDT terecht komen en hierin kleine elektrische signalen genereren. Om deze zogenoemde '*edge reflections*' te minimaliseren worden er aan de zijkanten van het substraat speciale absorberende materialen, de zogenoemde '*acoustic absorbers*', aangebracht. Meestal worden hiervoor massa's gebruikt met een grote (mechanische) dempingsfactor, zoals epoxy-hars.

De bulk waves
Een tweede factor die bijdraagt aan de edge reflections wordt toegelicht aan de hand van de onderstaande figuur, een doorsnede door een SAW-chip. Dankzij het gepolijst oppervlak van het substraat zullen de in de zendende IDT gegenereerde golven zich voor het grootste deel voortplanten als akoestische oppervlakte golven. Een deel dringt echter toch door in het substraat en zal zich door deze massa voortplanten. Aan de onderzijde van het substraat worden deze golven gereflecteerd en gaan dan verder naar de ontvangende IDT. Ook deze golven genereren kleine spanningen, die uiteraard iets vertraagd zijn. De afgelegde weg van deze zogenoemde '*bulk waves*' is immers groter dan deze van de oppervlakte golven. Om deze golven te onderdrukken wordt het substraat door middel van dempende materialen in de behuizing gemonteerd.

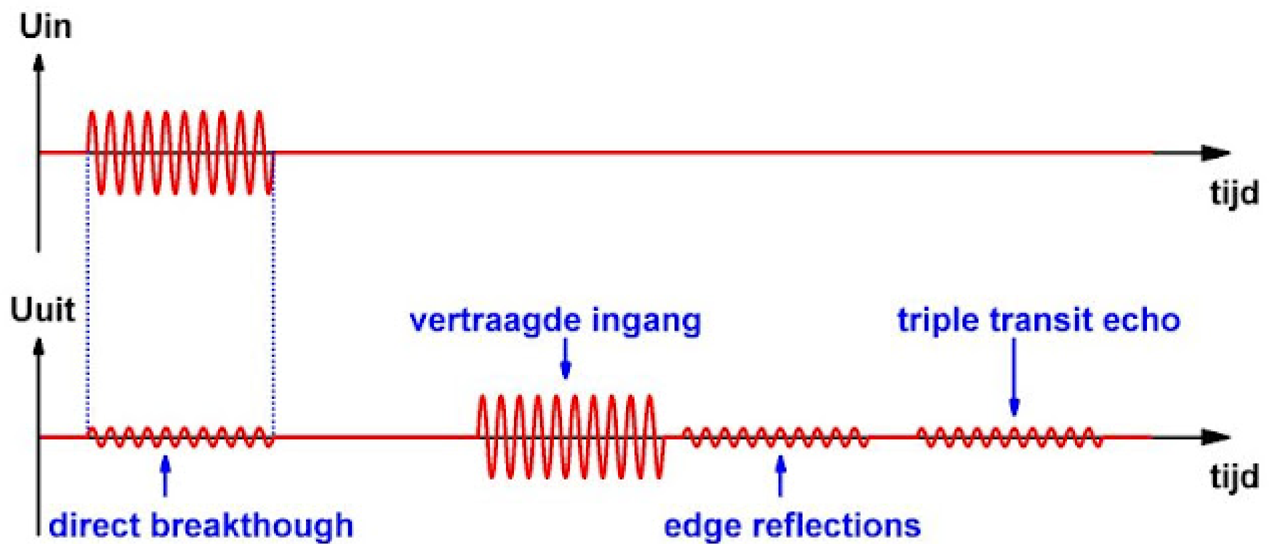


De bulk waves dragen bij aan de edge reflections. (© 2021 Jos Verstraten)

De puls respons van een SAW-chip
Een aantal van de besproken eigenschappen van SAW's zorgt ervoor dat één zendende puls niet als dusdanig door de ontvangende IDT wordt gedetecteerd. In feite bestaat de respons van de IDT uit vier pulsen, die respectievelijk worden gegenereerd door:

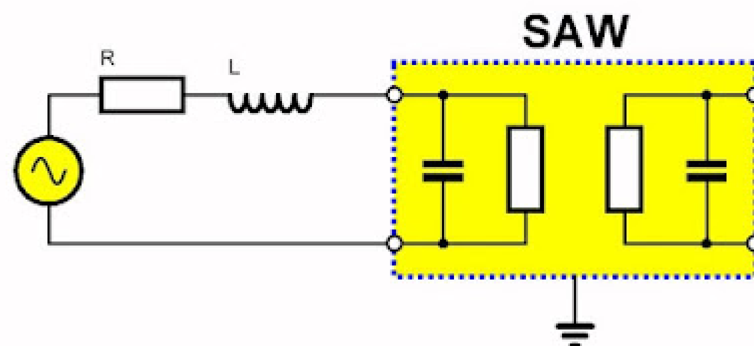
- De direct breakthrough
- Het eigenlijke (vertraagde) zendsignaal
- De edge reflections met de bulk waves
- De triple transit echo

De respons van een SAW op een puls aan de ingang kan dus worden samengevat als getekend in de onderstaande figuur.



De puls respons van een SAW-chip. (© 2021 Jos Verstraten)

Het equivalent schema
Een IDT gedraagt zich niet als een ohmse weerstand, maar als een capacitieve impedantie. Dat is logisch want de constructie, met zijn op een bepaalde afstand van elkaar geplaatste vingers die in elkaar grijpen, is in feite een schoolvoorbeeld van een condensator. Vandaar dat men een SAW-component elektrisch kan voorstellen als getekend in de onderstaande figuur.
Iedere IDT is opgebouwd uit de parallel schakeling van een condensator en een (zeer grote) weerstand. Omdat SAW's voornamelijk bij zeer hoge frequenties worden toegepast, kunnen de condensatoren gemakkelijk afgestemde kringen vormen met de inductiviteit van de er op aangesloten onderdelen of zelfs van de sporen op een print. Er ontstaan dan allerlei opslingeringsverschijnselen die moeilijk in de hand zijn te houden. Vandaar dat men vaak een spoeltje L en een weerstand R in serie met de IDT opneemt. De bedoeling is dat deze componenten, samen met de capaciteit van de IDT, een resonantiekring vormen die wordt afgestemd op de werkfrequentie van het onderdeel. Het geheel wordt daardoor minder kwetsbaar voor elektrische beïnvloeding door de buitenwereld.

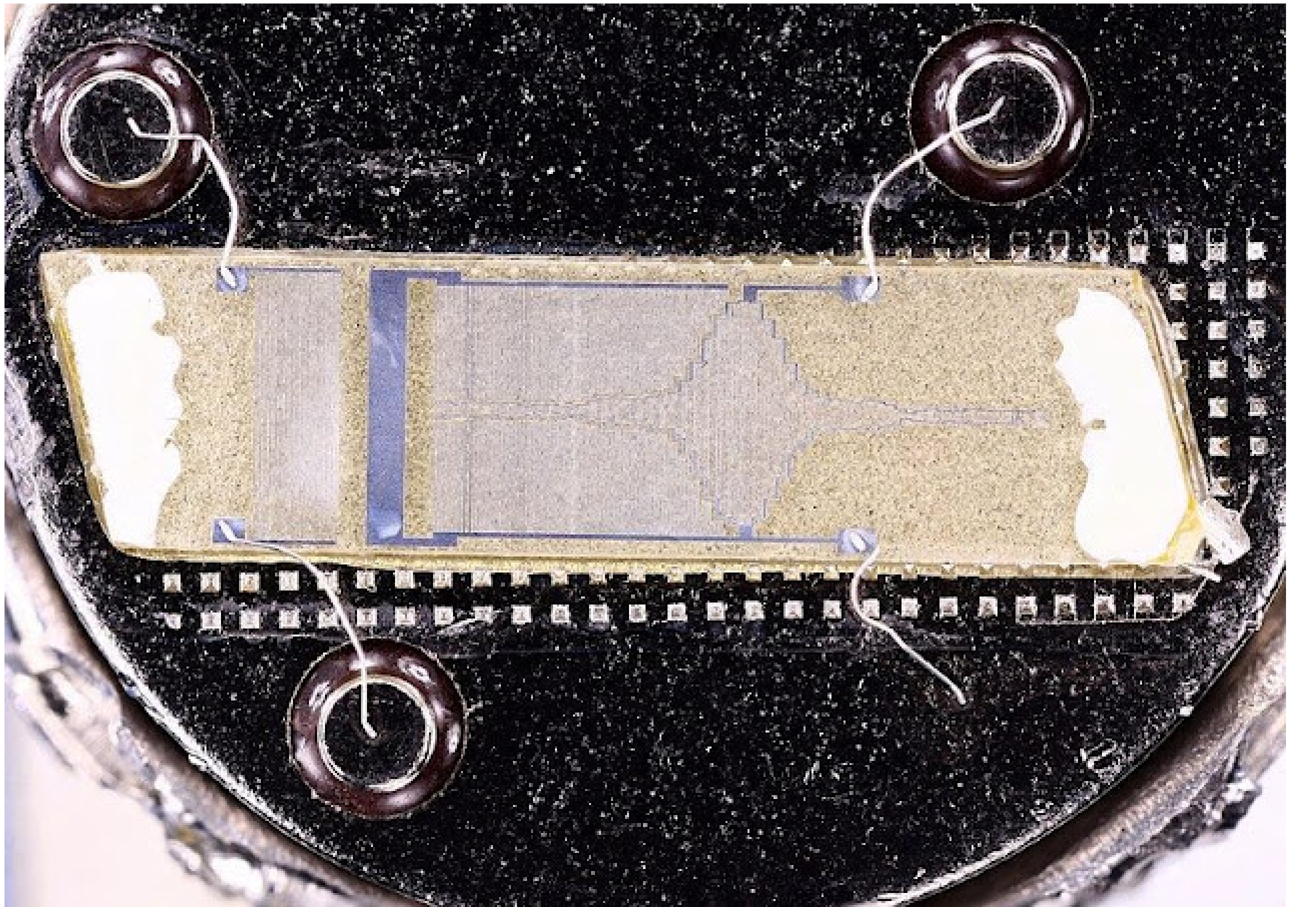


Het equivalent schema van een SAW-chip. (© 2021 Jos Verstraten)

Soorten SAW-componenten

Inleiding
SAW-chip's zijn zeer universele analoge componenten. Het zal duidelijk zijn dat de basisstructuur van een SAW-chip, een substraat met daarop twee IDT's opgedampt, een analoge vertragingslijn vormt. Het ingangssignaal wordt immers door de beperkte voortplantingssnelheid van de oppervlakte golven door het substraat vertraagd. Daarnaast zijn er echter speciale SAW-chip's ontwikkeld, waarvan het ontwerp volledig is toegespitst op een bepaalde applicatie. Het blijkt namelijk mogelijk door aan de IDT's een zeer specifieke

geometrie te geven de eigenschappen van het SAW-component aan zeer specifieke wensen aan te passen. Als voorbeeld ziet u in de onderstaande foto een wel heel specifieke geometrie van de IDT's in een SAW-chip. Duidelijk zijn op deze foto alle besproken onderdelen van een SAW-chip te herkennen.



Een voorbeeld van een zeer specifieke IDT-geometrie. (© 2019 Wikimedia Commons)

De soorten SAW-chip's die worden besproken
SAW-chip's worden tegenwoordig toegepast in vrijwel alle apparaten die iets met HF-zenden en -ontvangen te maken hebben, zoals smartphones, GPS-ontvangers en -trackers, satellietontvangers, radar's, TV's. Door de geometrie van de IDT's aan te passen kan men ieder gewenste doorlaatband en bandbreedte realiseren. Er zijn dus honderden, misschien wel duizenden diverse SAW-chip's op de markt. Men kan echter de meeste van die chip's indelen in een van de onderstaande categorieën:

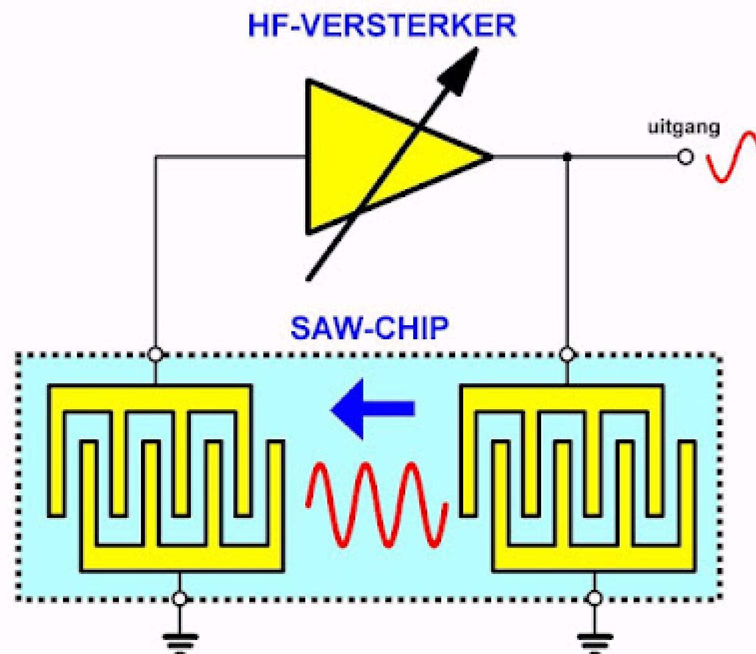
- SAW-chip's als vertragingslijn
- SAW-resonatoren
- SAW-filters
- Multistrip-SAW's
- Dispersive-SAW's
- Convolver-SAW's

In de volgende paragrafen zullen wij deze componenten in het kort aan u voorstellen.

De SAW-chip als vertragingslijn
De standaard SAW-chip, zoals die tot nu toe besproken is, is niets meer of minder dan een analoge vertragingslijn. De vertragingstijd wordt bepaald door de afstand tussen de twee IDT's en dus in feite door de lengte van het substraat. Nu zal het duidelijk zijn dat men de lengte van dit substraat niet onbegrensd kan opvoeren. Vandaar dat de te realiseren vertragingstijd ligt tussen ongeveer 400 ns en 100 µs. Er worden wel pogingen gewaagd langere tijden te verkrijgen door gebruik te maken van een opgevouwen of opgerold substraat.
Vertragingslijnen worden veel toegepast in de HF-techniek. In iedere analoge kleuren-TV zit minstens één SAW-chip, die als vertrager wordt gebruikt. Het is namelijk noodzakelijk de totale signaalinhoud van één beeldlijn voor de duur van één periode, dat wil zeggen ongeveer

64 µs, te vertragen.

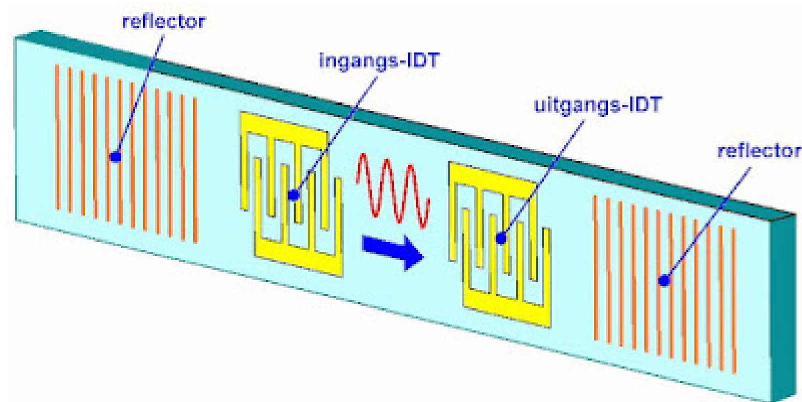
De SAW-chip als oscillator
Met vertragingslijnen kunt u echter ook oscillators samenstellen. Het principiële schema hiervan is getekend in de onderstaande figuur. De SAW-chip wordt opgenomen in de terugkoppeling van een versterker. Deze schakeling kan gaan oscilleren als aan de twee zogenoemde oscillatievoorwaarden wordt voldaan:
Voorwaarde 1: als de versterker inverterend werkt, moet de SAW een fasedraaiïng van 180° genereren bij de oscillatie-frequentie.
Voorwaarde 2: de versterkingsfactor van de versterker moet zo geregeld worden, dat deze het verlies van de SAW-chip bij de oscillatiefrequentie precies opheft.



Het principe van een SAW-chip in een oscillator.
(© 2021 Jos Verstraten)

SAW-resonatoren
Aan beide voorwaarden, die overigens voor iedere oscillator gelden, kan gemakkelijk worden voldaan zodat men zonder meer kan stellen dat SAW vertragingslijnen ideale onderdelen zijn voor het samenstellen van zeer stabiele HF-oscillatoren. Met dergelijke eenvoudige schakelingen zijn oscillatoren te maken, die oscilleren op een grondfrequentie van 10 MHz tot 2,5 GHz. De eigenschappen van een standaard SAW-chip als oscillator kunnen aanmerkelijk verbeterd worden door enige extra onderdelen op het oppervlak van het substraat op te dampen. Men spreekt dan van SAW-resonatoren. De verbeteringen hebben voornamelijk betrekking op de kwaliteitsfactor. Door een SAW vertragingslijn te vervangen door een SAW-resonator, kan de kwaliteitsfactor opgevoerd worden tot 8.000.
De standaard samenstelling van een SAW-resonator is getekend in de onderstaande figuur. Naast de twee IDT's staan twee parallel gerichte reflectoren. De afstand tussen beide reflectoren bedraagt een geheel veelvoud van de halve golflengte van de gewenste oscillatorfrequentie. Bij een juiste dimensionering van de vier elementen op het oppervlak van het substraat treedt dan, als gevolg van het ontstaan van reflecties tussen beide reflectoren, een staande golf beweging op met als frequentie de gewenste oscillatie-frequentie. Bij de reflectoren wordt dankbaar gebruik gemaakt van het bij de IDT's volledig ongewenste effect van zijdelingse reflecties. De reflectoren zijn samengesteld uit enige honderdtallen parallelle vingers, die niet met elkaar zijn verbonden. De vingers hebben een dikte van $\lambda/4$ en een identieke onderlinge afstand. Voor frequenties van meer dan 1 GHz worden de metalen vingers vervangen door zeer fijne groefjes, die in het gepolijste oppervlak van het substraat worden geëtst.
Vanwege bepaalde vrij ingewikkelde fysische verschijnselen die in het substraat ontstaan, zal

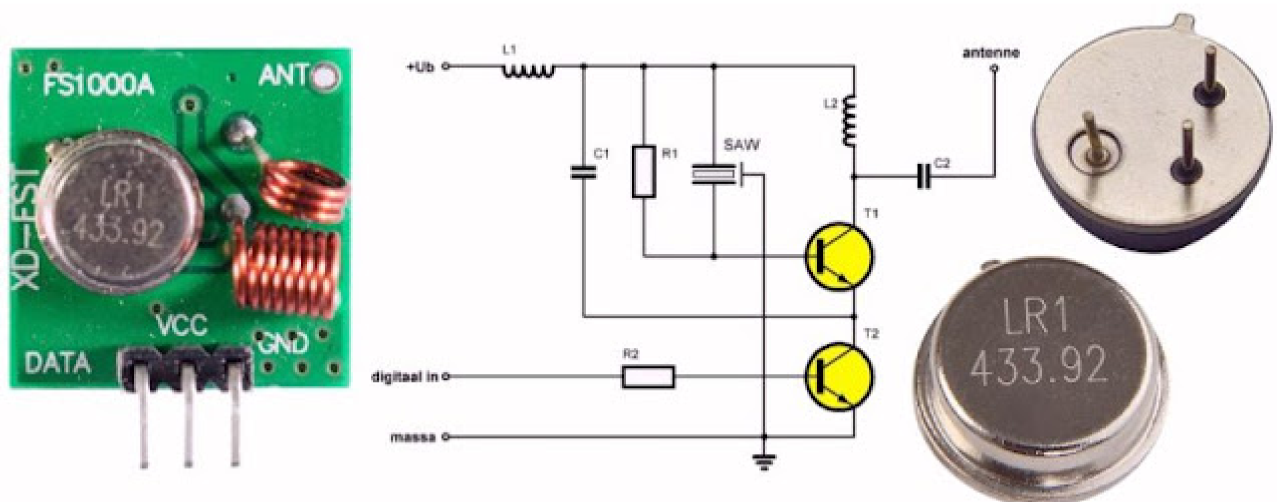
de frequentie-stabiliteit uitstekend zijn. Een temperatuursverloop van 50 °C heeft een frequentieverloop van slechts 75 ppm tot gevolg.



De samenstelling van een SAW-resonator. (© 2021 Jos Verstraten)

Een praktische schakeling met een SAW-resonator

In de onderstaande figuur is een praktische schakeling getekend van een HF-oscillator waarbij het frequentiebepalend element wordt gevormd door een SAW-resonator. Het schema is dat van een moduleerbaar zendertje dat werkt op 433,92 MHz en dat u bijvoorbeeld kunt gebruiken als zender voor eenvoudige draadloze afstandsbedieningen. De schakeling rond de transistor T1 is de eigenlijke oscillator. De transistor T2 schakelt de zender aan of uit, afhankelijk van het digitale signaal op zijn basis. De SAW-resonator zit in een metalen TO-39 behuizing met drie pootjes. De koude kanten van beide IDT's zijn met elkaar verbonden en gaan naar de massa van de schakeling. De hete kanten van de IDT's gaan naar de basis en de collector van T1 en verzorgen de voor oscillatie noodzakelijke meekoppeling.
Dergelijke in China in massa-productie gefabriceerde SAW-resonatoren, zoals de hier toegepaste LR1 433.92, zijn spotgoedkoop. U betaalt er in China tien dollarcent per stuk voor.

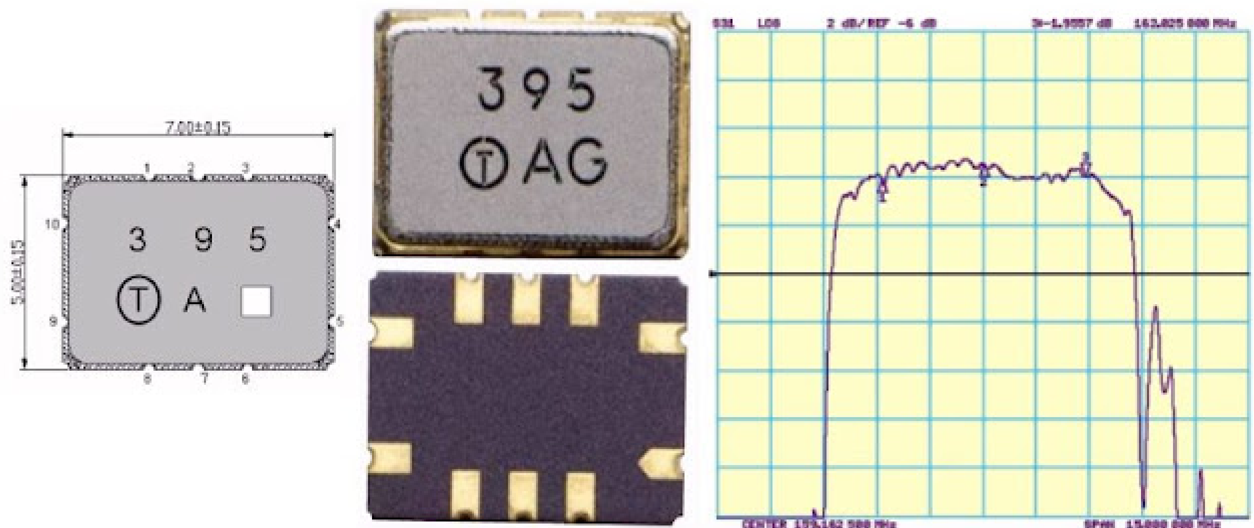


Een praktische schakeling met een SAW-resonator. (© 2021 Jos Verstraten)

SAW-filters

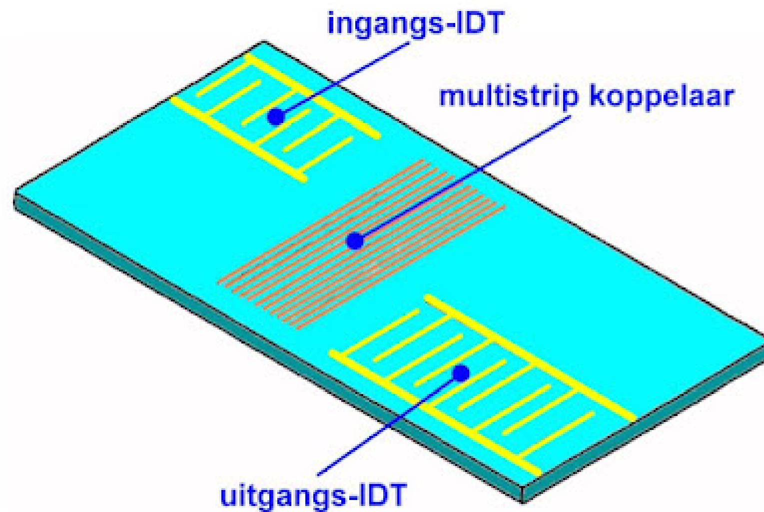
Door het aanpassen van de geometrie van de vingers kan men een SAW-chip bijna iedere gewenste frequentie/amplitude-karakteristiek geven. Hiervan wordt dankbaar gebruik gemaakt in allerlei HF-schakelingen, zoals satelliet-ontvangers, GPS-schakelingen en uiteraard smartphones. In dergelijke schakelingen worden immers soms vrij complex gevormde doorlaatbanden geëist, die met traditionele LC-netwerken maar heel moeilijk te realiseren zijn, veel te duur zijn en veel te veel plaats innemen.
Als voorbeeld tonen wij in de onderstaande foto de 395AG, een SMD SAW-filter met een centrale frequentie van 159,1625 MHz en een bandbreedte van 5,725 MHz. Dergelijke filters worden toegepast in zogenaamde AIS-ontvangers. AIS staat voor '*Automatic Identification System*' een systeem dat onder andere op wereldwijde schaal wordt gebruikt voor het volgen

en identificeren van schepen die de wereldzeeën bevaren.



Een SAW-banddoorlaatfilter voor 159,1625 MHz. (© 2021 Jos Verstraten)

De multistrip-SAW
Een nadeel van het gebruik van SAW-filters is dat er vrij grote looptijden ontstaan. Het filter vertraagt immers het signaal. In principe kunnen deze vertragingen natuurlijk geminimaliseerd worden door de twee IDT's dicht bij elkaar te plaatsen. Maar dat ontstaan er weer allerlei technologische problemen. Die zijn echter op te lossen door gebruik te maken van zogenoemde multistrip-SAW's.
De multistrip-SAW is een speciale uitvoering van de SAW-vertragingslijn. De algemene eigenschap van multistrip geometrieën is dat beide IDT's niet in elkaars verlengde staan, maar verschoven zijn. Men noemt dit offset-IDT's. Tussen beide IDT's is dan een de multistrip opgenomen. De typische geometrie van een dergelijke SAW is voorgesteld in de onderstaande figuur.
Wat zijn de voordelen van dergelijke opstelling? Het grote voordeel is dat een dergelijk constructie veel minder last heeft van de reeds beschreven bulk waves, die door het substraat van de ene naar de andere IDT gaan. Natuurlijk zal de oppervlakte golf die door de zendende IDT wordt uitgestraald niet rechtstreeks op de ontvangende IDT terecht komen. Door het aanbrengen van de multistrip koppelaar tussen beide IDT's worden de uitgezonden oppervlakte golven echter afgebogen en komen alsnog op de ontvangende IDT terecht. Een tweede voordeel van deze constructie is dat beide IDT's dichter bij elkaar geplaatst kunnen worden, omdat de oppervlakte golven nu een langere weg afleggen.
Voor een bepaalde vertraging kan men dus de lengte van het substraat verkleinen. Of, als zo weinig mogelijk vertraging gewenst is, kan men de geometrie optimaliseren voor kleine vertraging en optimale bandbreedte. Een derde voordeel van de multistrip geometrie is dat de rechtstreekse elektromagnetische en capacitieve koppeling tussen de in- en de uitgang veel kleiner wordt.



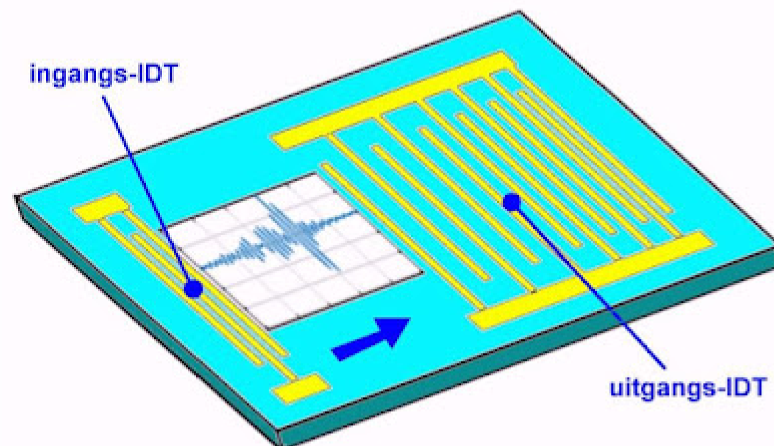
De basis samenstelling van een multistrip-SAW.
(© 2021 Jos Verstraten)

In de praktijk wordt de multistrip geometrie vaak toegepast. Om een idee te krijgen van de complexiteit van de geometrie van dergelijke SAW's wordt in de onderstaande figuur de sterk vergrote lay-out van een dergelijke geometrie voorgesteld. Deze tekening geeft de geometrie van een door Philips ontwikkelde multistrip SAW voor radar toepassingen. Let hierbij vooral op de manier waarop de linker IDT is vorm gegeven! De witte stipjes zijn geen foutjes in de tekening, maar geven een idee van de ingewikkelde geometrie van de individuele vingers van een IDT.


De geometrie van een multistrip-SAW voor radar-toepassingen.
(© Philips Semiconductors)

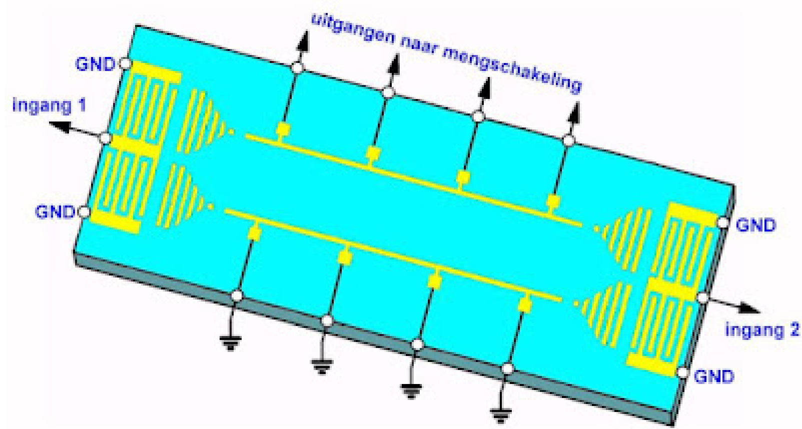
Dispersive-SAW's
Frequentie-analyse vormt een zeer belangrijke tak van de elektronische meettechniek. Zoals bekend stelt de theorie van Fourier dat ieder periodiek signaal in wezen bestaat uit sinussen met verschillende frequenties, amplituden en fasen: de zogenoemde harmonischen. Het analyseren van een bepaald vreemd gevormd signaal in zijn harmonischen vertelt heel veel over dit signaal. In feite is deze harmonische analyse net zo iets als een DNA-analyse van een levend wezen. Frequentie-analysatoren, ook spectrum analysers genoemd, worden dan ook veel toegepast, maar zijn heel ingewikkelde en dure apparaten.
Onder bepaalde voorwaarden kan die hele ingewikkelde elektronica vervangen worden door één SAW met een zeer speciale geometrie. De input-IDT bestaat uit slechts twee vingers en is dus heel breedbandig. De output-IDT is zeer speciaal vormgegeven en wel zo dat de afstand tussen de vingers steeds kleiner wordt. Stel nu dat aan de input-IDT een zeer smalle, willekeurig gevormde puls wordt aangelegd. De SAW zal als het ware een Fourier-analyse uitvoeren op deze puls en sinusvormige oppervlakte golven met de in de puls aanwezige frequenties en amplituden genereren. Deze golven migreren naar de output-IDT. De snelheid

van de golven is vrijwel constant. De vingers die het verst uit elkaar liggen zijn het gevoeligst voor de lage frequenties in het samengesteld golfsignaal. De vingers waarvan de onderlinge afstand het kleinst is zijn het gevoeligst voor de golven met de hoogste frequentie. Natuurlijk worden alle signalen door de busbars van de IDT gesommeerd.
Het zal echter duidelijk zijn dat de spanningen die gegenereerd worden door de lage frequenties het eerst verschijnen. De afstand die deze golven moeten afleggen alvorens zij door de vingers van de output-IDT in een spanning worden omgezet is immers het kleinst. Op de uitgang ontstaat dus een spanning, waarvan het amplitude-verloop in de tijd een getrouwe indruk geeft van de frequentie samenstelling van de puls aan de ingang. Het volstaat dus de uitgangsspanning gelijk te richten en aan te bieden aan een oscilloscoop die getriggerd wordt door de ingangspuls om het frequentiespectrum van de ingangspuls op het scherm te zetten. Natuurlijk heeft het systeem wel als nadeel dat het alleen werkt als de ingangspuls smal is. Maar het zal duidelijk zijn dat dergelijke dispersive-SAW's enorme mogelijkheden hebben.



De geometrie een dispersive-SAW. (© 2021 Jos Verstraten)

Convolver-SAW's
Een zeer specifieke, maar ook zeer professionele toepassing van SAW's is het vermenigvuldigen van twee analoge signalen. Zijn die twee signalen sinusvormig, dan kan men wiskundig aantonen dat er in het product een factor aanwezig is met de dubbele frequentie. Met deze techniek die '*convolving*' heet, kan men dus frequentieverdubbelaars realiseren, iets waar met name in de professionele HF-techniek erg veel toepassingen voor te verzinnen zijn. Men is er in geslaagd speciale SAW's te ontwerpen, waarbij de eigenschappen van de oppervlakte golven worden gebruikt om convolving op het substraat te realiseren. Hoe een dergelijke convolving-SAW er uit zien valt af te leiden uit de onderstaande figuur. De SAW-chip heeft twee volledig identieke IDT's, die aan de twee uiteinden van het substraat zijn opgedampt. Aan beide IDT's worden signalen met dezelfde frequentie toegevoerd. De oppervlakte golven die ontstaan worden door twee multistrip focusseringen gericht op twee integratie-elektroden.
Gevolg gevend aan de algemene wetten van de golfmechanica, zullen de twee golven die naar elkaar toe bewegen met elkaar gaan interfereren. Het gevolg is dat er allerlei menggolven ontstaan waaronder een met de dubbele frequentie. Het uitgangssignaal beslaat dus een bandbreedte die dubbel zo groot is als de bandbreedte van de ingangssignalen.



De geometrie een convolver-SAW. (© 2021 Jos Verstraten)

Naast de genoemde toepassing als frequentieverdubbelaar kan men met convolver-SAW's nog heel wat meer. Een convolver-SAW is per definitie een analoge vermenigvuldiger. Men heeft typen ontwikkeld, die bijvoorbeeld per seconde 2,5 ● 10^{11} analoge vermenigvuldigingen kunnen uitvoeren! Dit is heel wat meer dan de rekencapaciteit van zelfs de modernste processor-systemen. Convolver-SAW's worden vaak toegepast in de militaire en ruimtevaart elektronica. Het lijkt echter niet erg waarschijnlijk dat u als gemiddelde doe-het-zelver er ooit mee te maken zult krijgen!